

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

Pengelasan adalah salah satu proses teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam penambah dan menghasilkan sambungan yang kontinyu (Permana et al., 2016) Menurut (Amin Ahmadil, 2017) Pengelasan adalah proses penyambungan setempat antara dua bagian logam dengan cara memanaskannya hingga mencapai titik leleh dari logam tersebut dengan memanfaatkan energi panas yang berasal dari nyala busur ataupun gesekan. Pengelasan merupakan suatu proses penting dalam dunia industri dan merupakan bagian yang tak terpisahkan dari pertumbuhan industri, karena memegang peranan utama dalam rekayasa dan reparasi produksi logam. Menurut (Wijayanto, 2012) Pengelasan merupakan bagian tak terpisahkan dari pertumbuhan peningkatan industri karena memegang peranan utama dalam rekayasa dan reparasi produksi logam. Lingkup penggunaan teknik pengelasan dalam bidang konstruksi sangat luas, meliputi perkapalan, jembatan, rangka batang berupa Baja atau Aluminium, pipa saluran dan lain sebagainya. Karena itu rancangan las harus betul-betul memperhatikan kesesuaian antara sifat-sifat las yaitu kekuatan dari sambungan dan memperhatikan sambungan yang akan dilas, sehingga hasil dari pengelasan sesuai dengan yang diharapkan.

2.2 Friction Stir Welding

FSW merupakan metode pengelasan dengan prinsip kerja memanfaatkan gesekan dari benda kerja yang berputar dengan benda kerja lain yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja yang diam tersebut sehingga tersambung menjadi satu (Permana et al., 2016). Friction stir welding (FSW) adalah proses pengelasan inovatif yang dikenal sebagai proses pengelasan solid state. Teknologi terbaru dalam pengelasan, pengelasan ini sangat sesuai dengan paduan kekuatan tinggi yang banyak digunakan di industri pesawat terbang, karena aluminium paduan kekuatan tinggi sulit untuk bergabung dengan teknik pengelasan fusi konvensional (Sidhu & Chatha, 2012) FSW adalah gabungan solid state yang memungkinkan untuk bergabung secara berbeda bahan. Dalam proses ini, alat rotasi tidak habis pakai menembus garis sendi dan membuat bahan sekitarnya pucat, oleh panas dari gesekan setelah penetrasi (Hamed Aghajani Derazkola et al., 2016) FSW adalah salah satu metode pengelasan solid state dimana hasil sambungan las terbentuk tanpa melalui pelelehan material. FSW memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara benda kerja dan tool yang berputar, sedangkan penyambungan material merupakan hasil dari deformasi plastis akibat adukan pin di lokasi pengelasan (Irfan & Tarmizi, 2017). Menurut (Moh et al., 2011) FSW (*friction stir welding*) adalah sebuah metode pengelasan yang termasuk pengelasan gesek, yang pada prosesnya tidak memerlukan bahan penambah atau pengisi. Panas yang digunakan untuk mencairkan logam kerja dihasilkan dari gesekan antara benda yang berputar (*pin*) dengan benda yang diam (benda kerja). *Pin* berputar dengan kecepatan konstan disentuh ke material kerja yang telah dicekam. Gesekan antara kedua benda tersebut menimbulkan panas sampai $\pm 80\%$ dari titik

cair material kerja dan selanjutnya *pin* ditekan dan ditarik searah daerah yang akan dilas. Putaran dari *pin* searah jarum jam atau berlawanan dengan arah jarum jam. FSW telah banyak digunakan di berbagai bidang industri karena sambungan FSW memiliki sifat mekanik yang sangat baik karena butiran halus yang direkristalisasi dalam zona aduk. (Morisada et al., 2015)

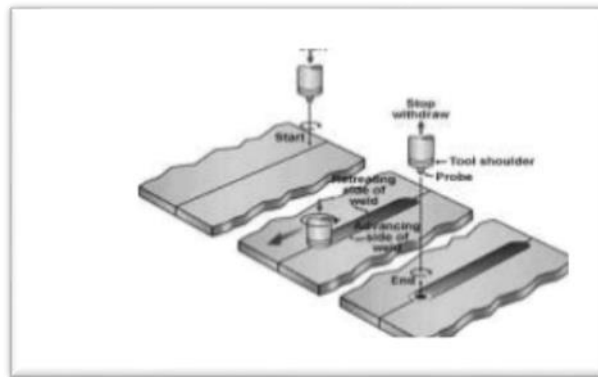
Pin yang digunakan pada pengelasan *Friction Stir Welding* harus mempunyai titik cair dan kekerasan yang lebih dibandingkan dengan material kerja, sehingga hasil lasan bisa baik. Pengelasan dengan menggunakan metode FSW bisa digunakan untuk menyambungkan material yang sama (*similar metal*) ataupun material yang tidak sama (*dissimilar metal*) seperti baja dengan baja tahan karat, aluminium dengan kuningan dan memungkinkan untuk mengelas kombinasi material lain yang tidak dapat di las dengan menggunakan metode pengelasan yang lain. Parameter pengelasan yang dilakukan harus disesuaikan sedemikian rupa, sehingga pengurangan volume dari pin ketika terjadi gesekan dengan material kerja bisa diperkecil. Hal ini bertujuan untuk menjaga masukan panas yang konstan sepanjang pengelasan (Budi, 2015).

Las FSW mempunyai beberapa keunggulan seperti mampu mengelas beberapa paduan aluminium yang sulit dilas (sifat mampu las rendah) termasuk menyambung jenis aluminium yang berbeda (*dissimilar joint*) (Wartono, 2013). Keunggulan lain pengelasan FSW adalah fleksibilitas tinggi, biaya pemrosesan rendah tanpa polusi lingkungan yang parah, dan tidak membutuhkan tukang las yang terampil (H. Aghajani Derazkola & Simchi, 2018).

Meskipun mempunyai kelebihan metode ini juga memiliki kekurangan seperti halnya dibutuhkan kekuatan yang sangat tinggi untuk proses clamping material las agar bergerak ketika pengelasan sedang berlangsung, tidak fleksibel dibandingkan pengelasan busur nyala (Wijayanto, 2012). Masalah dapat terjadi apabila hilangnya kekuatan dan pembentukan cacat saat proses pengelasan berlangsung (Salih et al., 2015)

2.2.1 Prinsip Kerja *Friction stir welding*

Prinsip friction stir welding pada gambar 2.1, gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses friction stir welding, sebuah tool yang berputar ditekan pada material yang akan disatukan. Kemudian gesekan tool yang berbentuk silindris (*cylindrical shoulder*) yang dilengkapi pin/probe dengan material, mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakkan bagian tersebut, tool akan bergerak pada kecepatan tetap dan bergerak melintang pada jalur pengelasan (*joint line*) dari material yang akan disatukan (Angger Sudrajat dan Mahros Darsin, 2012).



Gambar 2.1. Prinsip *friction stir welding*

(Sumber : (Angger Sudrajat dan Mahros Darsin, 2012).

Tool yang bekerja pada *friction stir welding* diputar dengan rpm tetap dan melaju dengan kecepatan translasi yang tetap pula sepanjang joining line diantara dua pelat benda kerja yang akan dilas. Gesekan antara kedua benda tersebut menimbulkan panas sampai 80 - 90 % dari titik cair material kerja dan selanjutnya pin ditekan dan ditarik searah daerah yang akan dilas. Prinsip kerja ini menunjukkan bahwa rotation speed dan welding speed menjadi parameter utamanya (Permana et al., 2016). material yang dilas diputar dan ditancapkan ke tepi berbatasan bagian aluminium yang akan disatukan. Setelah masuknya probe kedalam ketebalan material dan memungkinkan alat hanya menembus kedalam material (Muruganandam, 2011).

Prinsip kerja yang di gunakan dalam pengelasan *friction stir welding* menurut (R. jain et al, 2011)

1. Sisi maju adalah sisi plat tepat arah rotasi sama seperti perjalanan alat
2. Sisi mundur adalah sisi plat tepat arah berlawanan dengan perjalanan alat

3. Alat bahu adalah bagian dari alat yang bersentuhan langsung dengan bagian atas permukaan benda kerja
4. Pin adalah bagian yang paling di sepanjang garis pengelasan dan sebagai alat pencampuran bahan di benda kerja
5. Sudut kemiringan spindle adalah sudut antara normal keatas benda kerja permukaan dan sumbu alat

2.2.2 Parameter friction stir welding (FSW)

Menurut (Permana et al., 2016) hal yang utama untuk dikendalikan pada friction stir welding adalah gaya tekan (sumbu Z). Fungsi utama penekanan tersebut adalah untuk membangkitkan gesekan untuk melunakkan material yang akan disambung. Apabila hal tersebut dilakukan dengan baik maka dijamin jika gaya tekan ini cukup tinggi hasil akan bagus walaupun ada kelonggaran jarak di antara dua material yang akan disambung. Berdasarkan rangkingnya yang harus dikendalikan yaitu, gaya tekan turun, laju pengelasan, kecepatan putar pin, dan sudut puntir. Jika keempat parameter tersebut dikendalikan dengan bagus, hasilnya akan memuaskan. Parameter proses pengelasan FSW meliputi, kecepatan rotasi pahat, kecepatan pengelasan dan gaya aksial memiliki peran utama dalam menentukan kualitas lasan (Rajakumar & Balasubramanian, 2012)

Berikut adalah beberapa parameter pada *friction stir welding* menurut (Febrianto, 2018) sebagai berikut :

a. *Friction stir welding*

Kecepatan putaran probe yang tinggi (> 10000 rpm) dapat meningkatkan *strain rate* dan dapat mempengaruhi proses rekristalisasi. Putaran yang tinggi menghasilkan temperatur yang tinggi dan tingkat pendinginan yang lambat pada FSW.

b. Kecepatan pengelasan (mm/s)

Kecepatan pengelasan memiliki peranan vital dalam menghasilkan sambungan las yang baik. Dengan kecepatan pengelasan yang rendah akan menghasilkan sambungan dengan kuat tarik yang tinggi. Tetapi jika kecepatan pengelasan terlalu tinggi dari batas yang ditentukan maka akan timbul banyak cacat las.

c. Kekuatan Aksial (KN)

Tekanan tool adalah gaya tekan tool ke dalam aluminium.

d. Alat Geometri

Alat tersebut meliputi, D/d ratio of tool, Pin length (mm), Tool shoulder diameter, D (mm), Pin diameter, d (mm - Tool inclined angle (degrees)

2.3. Alumunium

Aluminium murni adalah logam yang lunak, tahan lama, ringan, dan dapat ditempa dengan penampilan luar bervariasi antara keperakan hingga abu-abu, tergantung kekasaran permukaannya. Kekuatan tarik Aluminium murni adalah 90

MPa, sedangkan aluminium paduan memiliki kekuatan tarik berkisar hingga 200 MPa. Aluminium memiliki berat sekitar satu pertiga baja, mudah ditebuk, diperlakukan dengan mesin, dicor, ditarik (*drawing*), dan diekstrusi. Resistansi terhadap korosi terjadi akibat fenomena pasivasi, yaitu terbentuknya lapisan Aluminium Oksida ketika Aluminium terpapar dengan udara bebas. Lapisan Aluminium Oksida ini mencegah terjadinya oksidasi lebih jauh. ((Budi, 2015). Paduan aluminium telah menjadi salah satu kandidat utama untuk pemilihan material di banyak industri, termasuk pesawat komersial dan militer dan sektor kelautan, selama lebih dari 80 tahun, terutama karena perilaku mekanik, kemudian desain, dan keberadaan teknik inspeksi yang mapan. (Kah et al., 2015) aluminium adalah bahan yang sangat baik dalam konteks kelautan. Salah satu contohnya penggunaan aluminium di banyak jenis kapal-kapal karena memiliki ketahanan terhadap korosi yang sangat baik. (Ertug & K, 2015).

Sifat teknik bahan aluminium murni dan aluminium paduan dipengaruhi oleh konsentrasi bahan dan perlakuan yang diberikan terhadap bahan tersebut. Aluminium terkenal sebagai bahan yang tahan terhadap korosi. Hal ini disebabkan oleh fenomena pasivasi, yaitu proses pembentukan lapisan aluminium oksida di permukaan logam aluminium segera setelah logam terpapar oleh udara bebas. Lapisan aluminium oksida ini mencegah terjadinya oksidasi lebih jauh. Namun, pasivasi dapat terjadi lebih lambat jika dipadukan dengan logam yang bersifat lebih katodik, karena dapat

mencegah oksidasi aluminium (Budi, 2015). Paduan Aluminium dapat digolongkan menjadi beberapa kelompok utama (Permana et al., 2016) seperti:

1. Paduan Aluminium Tempa (Aluminium Wrought Alloy)
2. Paduan Aluminium Cor (Aluminium Casting Alloy)
3. Paduan aluminium yang dapat diberi perlakuan panas (Heat-Treatable Aluminium Alloy)
4. Paduan aluminium yang tidak dapat diberi perlakuan panas (Non-Heat Treatable Aluminium Alloy)

2.3.1 Aluminium 5083

Alumunium terdiri dari beberapa kelompok yang dibedakan berdasarkan paduan penyusunnya. Penambahan paduan ini akan menghasilkan sifat yang berbeda pula. Alumunium 5083 merupakan paduan aluminium dengan magnesium (Mg), paduan ini memiliki sifat tidak dapat diperlakukan-panas, tetapi memiliki sifat baik dalam daya tahan korosi terutama korosi oleh air laut dan sifat mampu las Al-Mg banyak dipakai untuk konstruksi umum termasuk konstruksi kapal. Lapisan oksidasi di permukaan yang tidak terlihat dibawah normal kondisi atmosfer, meningkatkan ketahanan korosi dari paduan alumunium, Penambahan paduan ini akan menghasilkan sifat yang berbeda pula (Ramalingam & Ramasamy, 2017)

Tabel 2.1 Spesifikasi alumunium 5083

Element	Present(%)
Si	max 0.4
Fe	Max 0.4
Cu	Max 0.1
Mn	0.4 – 1.0
Mg	4.0 – 4.9
Cr	0.05 – 0.25
Zn	Max 0.25
Ti	Max 0.15
Al	Remainder

Sumber : (Budi, 2015)

2.4 Uji Distorsi

Distorsi adalah terjadinya perubahan bentuk atau penyimpangan bentuk oleh panas termasuk hasil proses pengelasan. Terjadinya pemuaian benda kerja mengakibatkan melengkung atau tertarik bagian-bagian sekitar benda kerja. Uji distorsi yang terjadi pada pengelasan akan mengakibatkan hasil pengelasan tidak presisi akibat perubahan dimensi yang terjadi, sehingga perlu dilakukan perlakuan tambahan untuk mengurangi distorsi yang terjadi. Menurut (Wibowo et al., 2016), upaya yang dapat dilakukan untuk meminimalisir dampak distorsi pada hasil pengelasan dengan cara peregangan komponen, optimalisasi pemotongan dan urutan pengelasan, pengurangan masukan panas, dan Transient Thermal Tensioning.

Menurut (Hendrianto, 2018), distorsi pada hasil pengelasan dibedakan menjadi 6 bentuk sebagai berikut:

1. Penyusutan melintang (Transverse shrinkage) yang muncul tegak lurus terhadap garis las.
2. Perubahan anguler berupa rotasi disekitar garis las (antar web dan flange).
3. Deformasi memanjang (Distorsi longitudinal)
4. Perubahan bentuk sudut.
5. Penyusutan memanjang (Longitudinal shrinkage) yang muncul paralel terhadap garis las.
6. Deformasi tekuk.

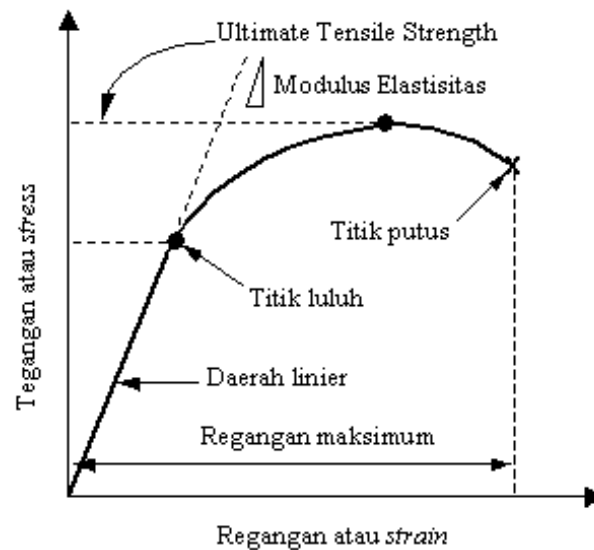
2.5 Sifat Mekanik

2.5.1 Uji Tarik

Uji tarik ialah pemberian gaya atau tegangan tarik kepada material dengan maksud untuk mengetahui atau mendeteksi kekuatan dari suatu material. Tegangan tarik yang digunakan adalah tegangan aktual eksternal atau perpanjangan sumbu benda uji. Uji tarik tersebut dilakukan dengan cara penarikan uji dengan gaya tarik secara terus menerus, sehingga bahan (perpajangannya) terus menerus meningkat dan teratur sampai putus dengan tujuan menentukan nilai tarik. Benda uji dijepit pada mesin uji tarik, kemudian beban statik dinaikkan secara bertahap sampai spesimen putus. Besarnya beban dan pertambahan panjang dihubungkan langsung dengan

plotter, sehingga diperoleh grafik tegangan (Kgf/mm^2) dan regangan (%) yang memberikan informasi data berupa tegangan luluh (σ_{ys}), tegangan ultimate (σ_{ult}), modulus elastisitas bahan (E), ketangguhan dan keuletan sambungan las yang diuji tarik. Mesin uji tarik sering diperlukan dalam kegiatan engineering untuk mengetahui sifat-sifat mekanik suatu material. Mesin uji tarik terdiri dari beberapa bagian pendukung utama, diantaranya kerangka, mekanisme pencekam spesimen, sistem penarik dan mekanisme, serta sistem pengukur (Permana et al., 2016). Peningkatan kecepatan rotasi menghasilkan penurunan perpanjangan tarik, sedangkan perpanjangan tarik meningkat apabila kecepatan pengelasan meningkat (Shanmuga Sundaram & Murugan, 2010).

Grafik yang diperoleh dari uji tarik pada umumnya digambarkan sebagai grafik tegangan-regangan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kurva tegangan-regangan

2.5.2 Uji Impact

Pengujian impact adalah suatu pengujian yang digunakan untuk menentukan sifat-sifat suatu material yang mendapatkan beban dinamis, sehingga dari pengujian ini dapat diketahui sifat ketangguhan suatu material baik dalam wujud liat maupun ulet serta getas. Dengan catatan bahwa apabila nilai atau harga impact semakin tinggi maka material tersebut memiliki keuletan yang tinggi. Dimana material uji dikatakan ulet jika patahan yang terjadi pada bidang patah tidak rata dan tampak berserat-serat. Tetapi apabila material getas, hasil dari patahan tampak dan mengkilap. Pada kondisi material ulet dapat mengalami patah getas dengan deformasi plastis yang sangat kecil. Nilai Harga Impact pada suatu specimen adalah energy yang diserap tiap satuan luas penampang lintang specimen uji. Persamaan menurut (Nurhafid Aji, 2017) sebagai berikut :

$$H = \frac{E}{A}$$

Keterangan:

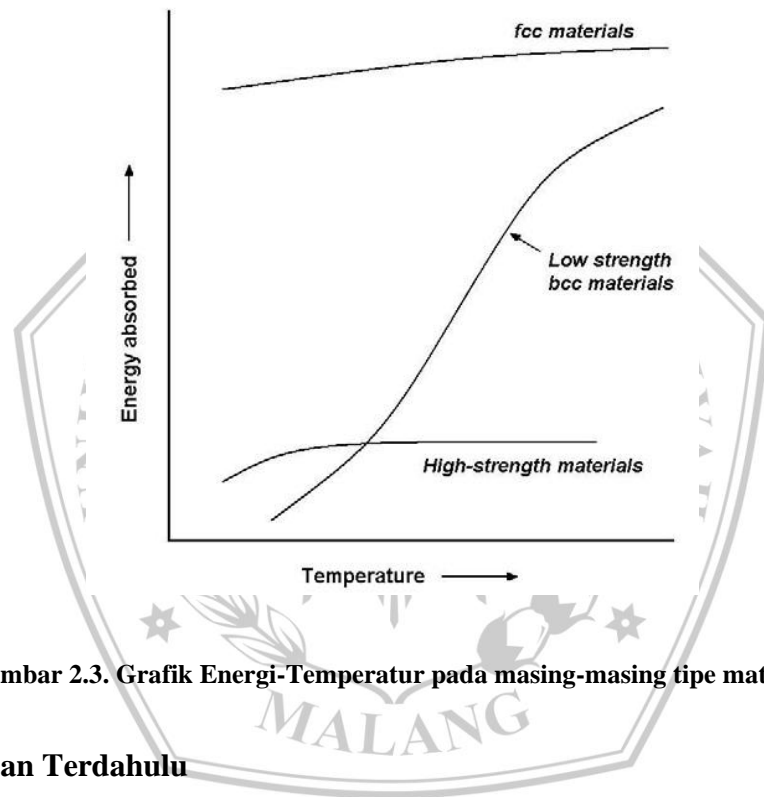
H= Nilai Impact (Joule,mm²)

E = Energi yang diserap (Joule)

A = Luas penampang bawah takik (mm²)

Secara keseluruhan besarnya harga impact yang didapat dari penggunaan bermacam bentuk pin dan ketebalan menunjukkan bahwa proses FSW menggunakan tool dengan pin berbentuk tirus beralur menghasilkan harga impact paling optimum.

Hasil ini menegaskan hasil pengujian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penggunaan tool dengan pin tirus beralur memberikan hasil yang lebih baik dibanding menggunakan pin bentuk silinder atau segitiga beralur (Irfan & Tarmizi, 2017). Pada hasil pengujian *impact* biasanya digambarkan dalam bentuk grafik hubungan energi-temperatur yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Grafik Energi-Temperatur pada masing-masing tipe material

2.6 Penelitian Terdahulu

(Bibit Sugito et al., 2016) melakukan penelitian tentang pengaruh kedalaman pin (plunge depth) terhadap sambungan las pada pengelasan Al 5083, Kecepatan putaran spindle adalah 1250 rpm, kecepatan makan adalah 12,5 mm / mnt, dan variasi kedalaman pin adalah 0,9 mm, 1,9 mm dan 2,9 mm. Hasil pengujian tarik diperoleh bahwa tegangan tarik rata – rata untuk pengelasan gesek dengan variasi kedalaman pembenaman (plunge depth) 0,9 mm adalah 160,75 MPa, untuk kedalaman

pembenaman (plunge depth) 1,9 mm adalah 177,78 MPa dan kedalaman pembenaman (plunge depth) 2,9 mm adalah 173,02 MPa. Dengan hasil ini dapat diketahui tegangan tarik rata – rata tertinggi pada variasi kedalaman pembenaman (plunge depth) 1,9 mm dan tegangan tarik rata – rata terendah pada variasi kedalaman pembenaman (plunge depth) 0,9 mm. didapatkan hasil semakin dalam depth plunge tegangan tarik mengalami kenaikan, tetapi pada kedalaman tertentu tegangan tarik mengalami penurunan karena kedalaman pin tool tidak terlalu dalam, mengakibatkan input panas yang kurang stabil sehinggakan mempengaruhi nilai tegangan tarik.

(Faruq, 2019) melakukan penelitian analisa pengaruh perbedaan diameter pin tool terhadap kekuatan tarik, impact, dan mikrografi pada aluminium 6061 dengan metode friction stir welding. Dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil tarik, impact, dan struktur mikrografi dengan feed rate 10 mm/menit dengan variasi diameter pin (6 mm, 7 mm, dan 8 mm) terhadap pengelasan FSW dengan jenis penyambungan butt joint. Hasil penelitian menunjukkan sambungan las FSW pada diameter 6 mm memiliki kekuatan uji tarik 85,82 MPa, regangan 10,89%, dan kekuatan uji impact 0,37 J. Pada diameter 7 mm memiliki kekuatan uji tarik 89,90 MPa, regangan 11,47%, dan kekuatan uji impact 0,38 J. Pada diameter 8 mm memiliki kekuatan uji tarik 143,17 MPa, regangan 13,71%, dan kekuatan uji impact 0,46 J. semakin lebar diameter pin dapat mempengaruhi lebar jalur pengelasan yang dihasilkan maka semakin baik sifat mekaniknya dan kekuatan tariknya mengalami keuletan bahan, sehingga nilai kekuatan impact dan tarik semakin besar, namun pada penelitian ini kekuatan tarik tertinggi mengalami penurunan jika dibandingkan dengan kekuatan tarik pada base metal dan nilai impact tertinggi mengalami

kenaikan dibandingkan pada base metal. Semakin besar diameter pin tool, maka semakin besar dan rapat ukuran butiran yang dihasilkan pada pengelasan ini, sehingga sifat mekaniknya semakin baik.

(Nurhafid Aji, 2017) melakukan penelitian Analisa Pengaruh Perbedaan Feed Rate Terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Aluminium 6061 Metode Pengelasan Friction Stir Welding , Proses pengelasan menggunakan putaran tool 1500 RPM, dengan feed rate 30 mm/min, 70 mm/min, 100 mm/min, dan 200 mm/min. Pengujian yang dilakukan yaitu uji tarik dengan menggunakan standar ASTM E 8M -00b dan uji impak metode charpy dengan standar ASTM E23. Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa feed rate 70 mm/min menghasilkan nilai kuat tarik maksimal terbaik yaitu sebesar 150, 06 MPa, dan feed rate 30 mm/min menghasilkan nilai kuat impak terbaik sebesar 0,21 J/mm². Dari hasil Pengujian tarik dan impak mempunyai kecenderungan semakin kecil feed rate yang digunakan maka semakin besar nilai kuat tarik dan impak yang diperoleh. Feed rate yang rendah menghasilkan panas yang cukup sepanjang jalur pengelasan sehingga mengalami deformasi plastis secara merata. Perpatahan yang terjadi pada pengujian impak dengan semakin besarnya feed rate adalah perpatahan campuran, yaitu gabungan perpatahan getas dan dikarenakan material yang dilakukan pengelasan tidak tersambung secara baik dan kurangnya kedalaman penetrasi pin dalam proses pengelasan. (Wibowo et al., 2016), dkk, melakukan penelitian Distorsi hasil pengelasan diukur dengan alat dial indicator pada tiap titik di grid line benda kerja. Pengukuran distorsi dilakukan diseluruh permukaan setelah suhu plat mencapai suhu kamar. Distorsi yang diselidiki pada 3 plat hasil pengelasan dengan variasi heat input (756 J/mm ; 846 J/mm and 936 J/mm)

perbedaan heat input menyebabkan terjadinya perubahan distorsi. Hasil pengukuran menunjukkan nilai distorsi arah longitudinal pada heat input 756 J/mm, 846 J/mm and 936 J/mm berturut-turut adalah 11,3 mm, 13,2 mm dan 14,1 mm, sehingga distorsi arah longitudinal minimal terjadi pada heat input 756 J/m. Demikian juga nilai distorsi arah transversal pada heat input 756 J/mm, 846 J/mm dan 936 J/mm, berturut-turut adalah 3,6 mm, 3,9 mm dan 4,0 mm, sehingga distorsi arah transversal minimal terjadi pada heat input 756 J/mm. Dari keterangan diatas dapat menjadi acuan bahwa penurunan heat input akan memperkecil terjadinya distorsi arah longitudinal (distorsi lengkung) maupun arah transversal (distorsi sudut). Hal ini dikarenakan heat input yang rendah akan mengurangi jumlah deposit logam las sehingga penyusutan di bagian arah longitudinal maupun arah transversal juga lebih kecil. Distorsi pengelasan tersebut juga berkaitan dengan distribusi temperatur yang terjadi pada daerah las. temperatur pada heat input 846 J/mm dan 936 J/mm, diukur pada arah transversal dengan jarak 4 mm, 10 mm, 30 mm dan 70 mm dari garis pusat las. Tiap titik termokopel memperlihatkan pemanasan sangat cepat sampai mencapai puncak, kemudian mulai pendinginan dengan lebih lambat ketika sumber panas menjauhi titik termokopel, sehingga sesuai dengan perumusan model double elipsoid . Temperatur maksimal pada heat input 936 J/mm cenderung lebih tinggi dari heat input 846 J/mm. Hal ini berbanding lurus dengan hasil pengukuran distorsi yang menyatakan bahwa kenaikan heat input memperbesar terjadinya distorsi. Dengan demikian, semakin tinggi temperatur maksimal saat pengelasan akan berakibat pada peningkatan distorsi khususnya distorsi lengkung. Penelitian (Huang et al., 2017) Kedalaman terjun optimal 0,05 mm diperoleh untuk ketebalan 0,5 mm Al-

6063. Kedalaman terjun yang lebih rendah atau lebih tinggi terhadap 0,05 mm menghasilkan cacat pengelasan seperti alur yang tidak terisi, kekuatan tarik maksimum 217 MPa. Pada sambungan dengan tarik lebih tinggi terletak pada HAZ yang memiliki minimum nilai kekerasan dan keuletan.

